

フレミングの右手・左手の法則に関する実験教材の作製

櫻井勇良*

The Manufacture of an Educational Activity Kit on Fleming's right- and left-hand rules

Yuryo Sakurai

Abstract:

This study describes the manufacture of an educational activity kit on Fleming's right- and left hand rules. Fleming's rules can be applied to describe two distinct phenomena: the generation of current in a conductor moving in a magnetic field, and the generation of a magnetic field produced by a current flowing in a conductor. Here, we outline the production, operation, and educational results of the activity materials.

KEY WORDS: Fleming's right- and left-hand rules, educational activity kit, magnetic field

要旨:

本研究では、フレミングの右手の法則およびフレミングの左手の法則に関する実験教材の作製について述べている。磁界中において運動する導体が存在する場合および通電した導体が存在する場合、これらの法則で説明できる事象が起こる。その事象への関心や興味を引き出すために試作した種々の実験器について作り方や動作結果などの概要を述べている。

キーワード: フレミングの右手・左手の法則、実験教材、磁界

1. はじめに

最近、理科離れ、理科嫌い、理工系離れなどの現象が問題視されている¹⁾。これへの対応はいろいろなレベルで実施されている。筆者は、これらの現象の理解とそれへの対応策の検討を脳科学（認知過程学）の知見を取り入れながら行っている。その過程で、対策の1つとして認知過程学の知見を積極的に取り入れた教材が有効であることと、それを開発研究しなければならない、と思うようになった。そこで、認知過程で得られている多くの知見の中で、特に、認知的不調和（驚き、当惑、協調欠如）が学習動機になり易い²⁾、といわれていることと、学習によって

得られる記憶は、記述的な記憶より経験的な記憶の方が長持ちする^{3), 4)}、という知見に着目し、これらを取り入れた実験教材の開発を行うようになった。認知的不調和には“驚き”、“当惑”、“協調欠如”の3つのタイプがある。“驚き”は、既知の知識に反する事象や情報に出会った時に生じる。“当惑”は、対象となる事項について複数の対立する見解が存在することを知った時に生じる。“協調欠如”は、手持ちの情報が一致しないと気付いた時に生じる。このような認知的不調和の経験が学習の動機付けになる。筆者は、上述の問題への対応策として、この事実に着目した教材を開発している。つまり、学習者に上記のような認知を誘発することを目指した実験教材を作ることを行なっている。

*湘南工科大学 工学部 電気電子工学科
准教授

これらの 3 つの要素は、独立的に存在するのではなく互いに連動している。驚きの中に当惑の部分もあり、当惑の中には協調欠如の部分もある。筆者は、これらの相互関係を踏まえると驚きの認知の中に全て収まってしまうといえる。そこで、筆者は、驚きという認知に着目した実験教材作りを行なっている。

従来は、事象の再現および可視化に着目して教材を試作していたが、上記の認知過程を含めるようになってからは、学習者の認知過程を想像するという困難な課題を克服しなければならなくなった。学習者すなわち他者の認知を想像するには、何らかの情報が必要になる。それに関する情報を入手するために、学習者との会話を積極的に行なっている。得られた情報を踏まえて、上記の認知を誘発させるために工夫を具現化している。実演における学習者の反応から検証し、その結果を踏まえて改善を行なうということを繰り返すようにしている。

実験教材を用い観察者を「驚かす」すなわちびっくりさせるために 1) 大型化を図り、ダイナミックな動きを見せるようにする、2) 光学素子を用い、動作に連動させて発光現象が起きるようにする、3) 動作に連動させて音が出るようにするなどを念頭においている。試作した実験器を用いた実験を観察することで驚きの認知と共に理解の対象としている事象への関心・興味が湧くことを期待するとともに、その思いを学習者に直接伝えるようにしている。

本稿では、その過程で得たフレミングの右手の法則およびフレミングの左手の法則に関する実験教材について報告する。

2. フレミングの左手の法則に関する実験器の試作

2.1 通電導体を用いた実験器の試作

平行な 2 本の導体に電流を流した場合、導体間には力が作用する。導体間に作用する力（斥力、引力）は、電流の向きに依存し、フレミングの左手の法則および右ねじの法則により理解できる。同方向通電時は、導線間には引力が発生するので間隔は狭くなり、異方向通電時は、斥力が発生するので間隔は広がる。

この現象を再現する実験器として幾つか存在する^{5), 6)}。しかし、これらは、理由は不明であるが、2 つの力を再現せず、斥力のみを再現している。そこで、2 つの力を再現する実験器の試作を行うことを考えた。また、観察者への印象を高める目的から装置の大型化を図った。

2.1.1 実験装置の試作および観察

2.1.1.1 試作器 1 の概要

図 1 に試作器 1 の外観を示す。木板（幅：40mm、長さ：2530mm、厚さ：10mm）に 3 つの電極（電極 1、電極 2、電極 3）を取り付ける（（図 1 (a) 参照、電極 1 と電極 2 の間隔は約 2460mm、電極 2 と電極 3 の間隔は約 2340mm）。ボルト（長さ：50mm、太さ：3mm）にアルミ管（内径：4mm、外径：6mm、長さ：9mm）を被せたものを電極として用いる。電極 1 の付近には、張力および電線の間隔などを調整するためにターンバックルを取り付ける（図 1 (b) 参照）。電極 2 を折り返し点として電極 1-電極 2-電極 3 に太さ 1mm のアルミ線（絶縁被膜有り）を取り付ける（図 1 (c) 参照）。直流電流を瞬間的に通電するための外部スイッチを接続する（図 1 (d) 参照）。

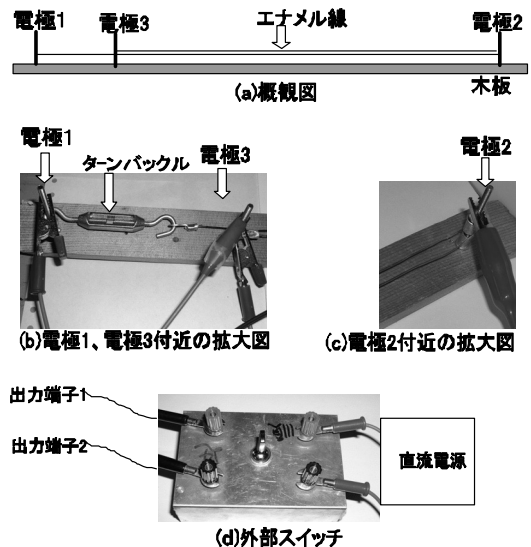


図 1 試作器 1 の外観

2.1.1.2 観察方法および観察結果

直流電源（～60V、～50A）を用いる。同方向通電の場合、電極 1 と電極 3 をリード線で接続し、そこと電極 2 の間に電源を接続する。異方向通電時は、電極 1 と電極 3 の間に電源を接続する。

観察例を図 2 に示す。図 2 (a)、(b) に示すように、同方向および異方向通電時における導線間隔の変化が確かめることができた。

観察において、斥力が発生する場合は、その変化がわかりやすかったが、引力の場合は、変化が小さ

くて見にくい場合もあることに気づいた。そこで、引力の場合でもダイナミックに導線が動くようにするための工夫を行なった。その結果、太さ 1mm のアルミ線（絶縁被膜有り）をコイル状（直径：約 16 cm、巻数：約 200）にして重ね合わせれば良いことが分かった。

コイルの端子間に通电した時の観察例を図3に示す。図3（a）に示すように適当な間隔で広げておいたコイルは、通电の瞬間に両側から中央に向かって導線が押し寄せるに動くのが観察できた。導線には一方向の電流が流れているので円状に流れている電流間に生成する力（引力）を観察したことになる。非常にダイナミックな観察ができる。また、コイルを吊さずに机の上に置き、下部から上部へと中心線を合わせながら手で横すべりさせてくずしていく。そして通电を行なうとくずし終わった部分から元の位置に戻るように動くのが観察できた。ゼンマイ仕掛けのおもちゃのような動き方が見られる。

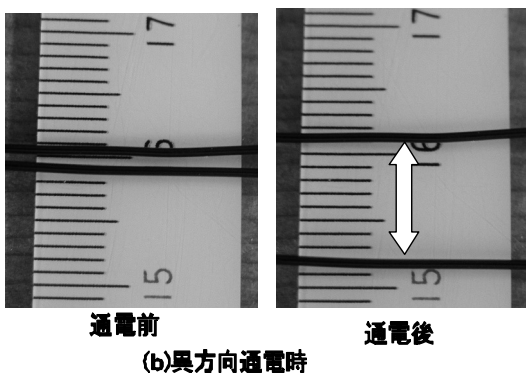
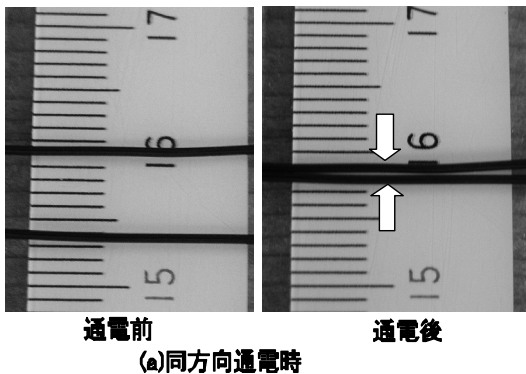
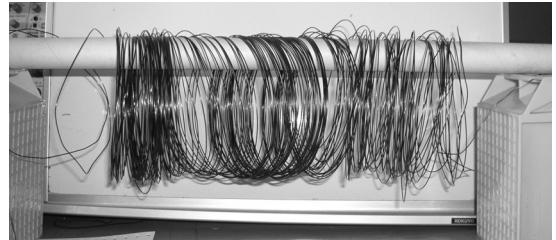
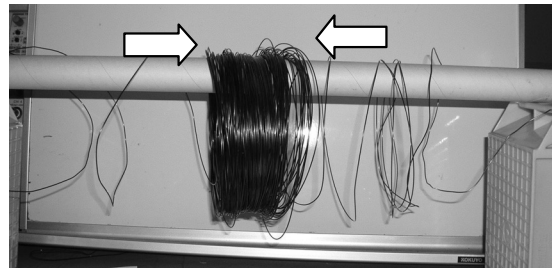


図2 通電後のエナメル線の様子



(a)通電前



(b)通電後

図3 通電後のコイルの様子（同方向通電時）

2.1.1.3 試作器2の概要

図4に試作器2の外観を示す。文献1、2を参考にして、アルミホイルを導体として用いたものである。ダイナミックな動きを現わすために大型にしたことと文献1、2では再現していなかった引力の動きも観察できるようにした。構造は、試作器1とほぼ同じである。

木板（高さ：1.8m、幅：10 cm、厚さ：2 cm）の上部に2本、下部ほぼ中央に1本の電極（アルミ管：長さ20 cm、外径3mm、内径2mm）を設置する。市販のアルミホイル（幅：25 cm、厚さ：12 μ m、）を重ね折して、幅約2 cmにしたものを導体とした。

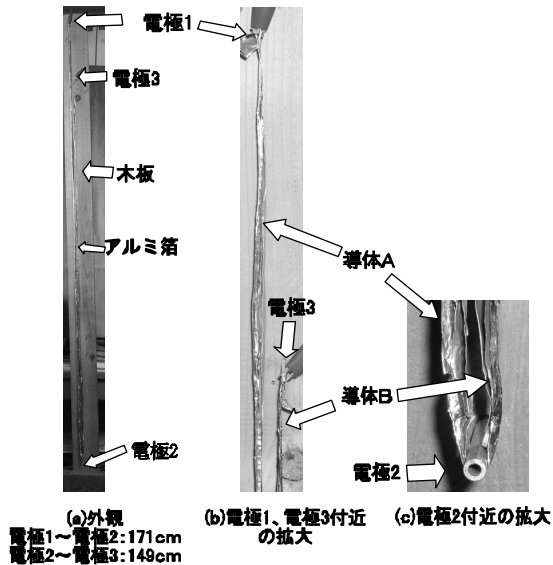


図 4 試作器 2 の外観および拡大図

2. 1. 1. 4 観察方法および観察結果

観察方法は、図 1 の試作器 1 の場合と同じである。図 5 に観察例を示す。試作器 1 の場合と異なっていたのは、アルミホイルの動き方である。同程度の電流を流してアルミホイルの動きとエナメル線の動きを比べた場合、相対的にアルミホイルの場合の方が大きな動きを示すのがわかった。特に、斥力の場合、エナメル線の場合と明らかに異なっていた。電流の大きさによっては、アルミホイルが勢いよく広がり、場合によっては、電極とアルミホイルを押さええているワニ口クリップが外れる時もあった。

これにより、ダイナミックに演示できる実験器を得ることができた。エナメル線に比べてアルミホイルの場合の方がダイナミックに動いたのは、特別な理由がなく、アルミが銅に比べて比重が小さかったことと対面する導体の面積を広くすることが可能であったことなどによるものと考えられる。

試作器 2 を使って他に気づいたこととして、エナメル線の場合は、ジュール熱により垂れ下がる場合があったが、アルミホイルの場合は、その顕著な影響は見られなかった。

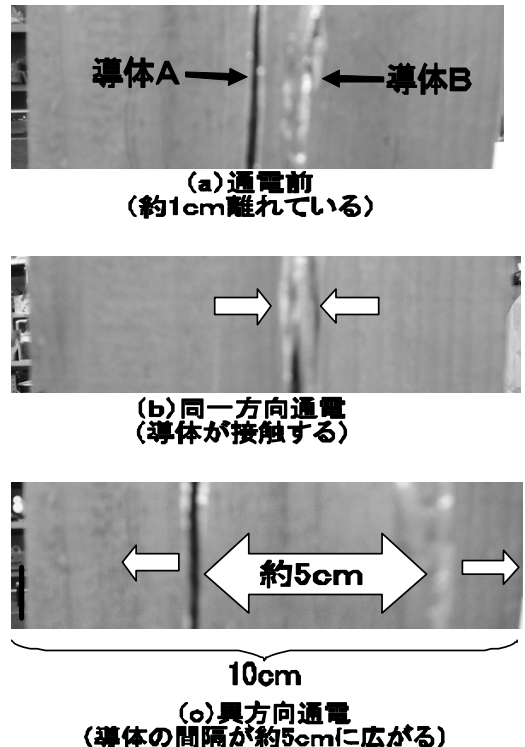


図 5 通電後のアルミ箔の様子

2. 1. 1. 5 電流相互間に働く力の覚え方

電流が流れれば、その周りに磁界が発生し、ある一定の量の仕事をする能力が蓄えられる。すなわち、静磁界にもとづくエネルギーが存在される。図 6 のように 2 本の平行電線に電流が流れた場合、電線間には電流の向きに依存した力（引力および斥力の電流力）が発生する。電流の向きと力の関係は、フレミングの左手の法則（図 6 (a)）および磁力線（図 6 (b)）から知ることができる。これらの方法は、電流の向き、磁界の向き、力の向きなどを覚え、右ネジの法則、フレミングの左手の法則、ベクトル積（ $F = I \times B$ ）などを使って一瞬に力の方向がわかるようになるまでは訓練が必要になる。そこで、より簡便な方法はないかどうかを検討した。その結果、円電流相互間の場合の結果を用いれば良いことに気づいたので紹介する。

円電流は、その開放面に S 極と N 極が対で形成されるすなわち磁気双極子とみなせる（図 7 (a)）。し

たがって、他の円状電流の中心軸を平行にして近接させた場合（図 7 (a)）および中心軸を一致させて近接させた場合に引力あるいは斥力が発生する。つまり、薄い磁石の極を近づけた時に発生する力の様子と同じになる。ここで、図 6 (b) と図 7 (a) を比べる。図 6 (b) の導体 A は図 7 (a) の N 文字の②の部分に相当し、図 6 (b) 導体 B は、図 7 (a) の S 文字の②に相当する。図 2 (a) の場合、S 極の円電流と N 極の円電流の中心軸を平行にして近接させた場合は引力が作用し、図 6 (b) と同じになる。図 7 (a) の円状電流の中心軸を一致させた場合も引力が発生する（図 7 (b) (ii)）。

以上のように平行電流相互間に働く力の種類と電流の向きとの関係は、上記のような事柄を覚えなくても、円電流における力の関係を電流の向き（磁極）の関係から簡単に見分けることができる。なお、文で覚えるならば、語呂合わせで次のような覚え方が考えられる。2つの力を覚えると混乱するので、1つだけすなわち斥力（反発力）を優先させて覚えることにする。「反対向きの電流の場合は反発力（斥力）が発生する」ことから反・反と覚えておけばよい。引力については、反対向きの電流の逆すなわち“同じ向きの電流の場合である”ことが自然に連想できると思われる。この他にも気の利いた覚え方があると思われるので思考することをすすめたい。

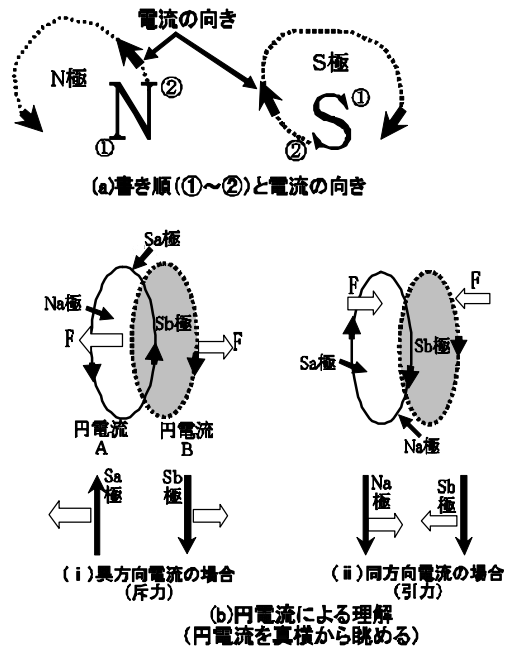


図 7 円電流相互間に働く力を引用した理解

2.2 真空放電を使った実験器の試作

フレミングの左手の法則は、電動機の原理として知られている。この法則への理解を深めるために様々な実験器が用いられる。実験器は、コイル、導線、磁石などによって作られるものが多い。

本稿では、真空放電（封入ガスなし）を使ったフレミングの左手の法則に関する実験を紹介する。誘導コイル（島津理科器械、MK-60、～60 kV）、ガイスラー管、真空ポンプ（ULVA、G-5）、磁石（ネオジウム、Φ：30mm、高さ：15mm、磁束密度：500mT）を用いて実験を行なう（図 8 参照）。

放電管の排気口と真空ポンプは専用の管でつなぎ、真空ポンプで排気しながら誘導コイルを動作させて放電状態を作る（淡い桃色、真空度 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^2$ Pa）。放電に伴い発光が見えるのでその筋道に磁石の端面（N および S 極）を近づけて光の筋道の動きを観察する。

観察例を図 9 に示す。放電管の正極から負極に向かって放電電流が流れる。それに対して磁石を近づける磁石の磁界の向きと放電電流の向きによって作用する力の向きが定まる。その定まった方向に放

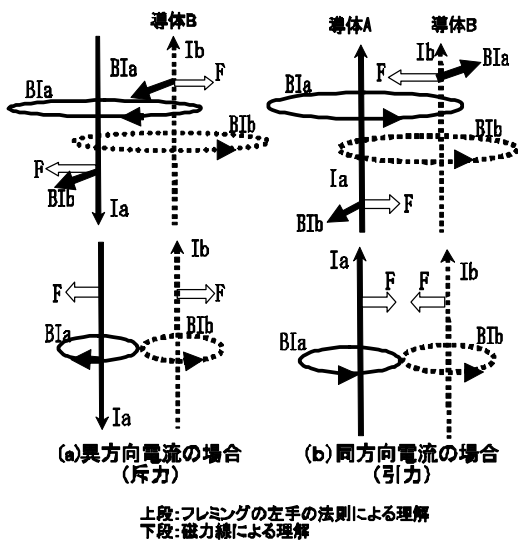


図 6 通電中の平行導体間に働く力

電流が曲がるのが確認できる。導線やコイルを使った場合は、それが動くがこの場合は、放電電流そのものが動くのが見えるので感動的である。曲がり方を大きく見せるために強力な磁石を用いているので、取り扱い特に磁性材料を近くに置かないことに注意する必要がある。あるいは、万が一のことを考えて手袋をはめることをすすめる。また、封入するガスの種類を変えられるようにすれば、演出効果が増すことが期待できる。さらに、高压の直流電圧を印加する装置を併用すれば、荷電粒子と電界の作用も観察することができる。

一般に、この種の実験は、クルックス管を用いて行なわれる場合が多い。本実験器は見栄えは良くないが、実験者が変化を作り出せるということができると、その分実感の高い観察ができることが有利であるといえる。

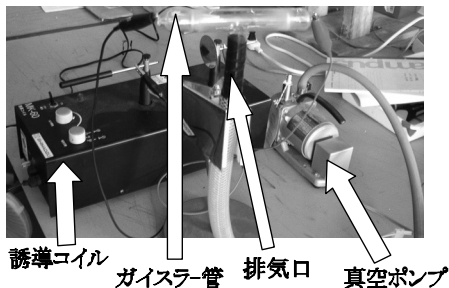


図 8 実験装置の概観図

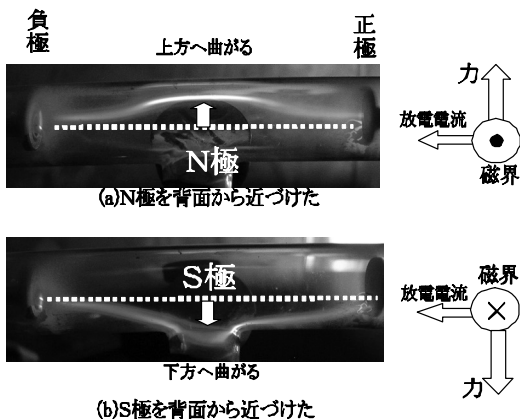


図 9 N 極および S 極を近づけたときの観察例

2.3 クリップモータの試作

クリップの名が付いたのは、電極の部分に事務用品として使われるゼムクリップ（以下クリップと略す）を用いているからである。回転子としてコイルを用いる。土台には紙コップ、木材、発泡スチロール、消しゴム、などいろいろなものを用いられる。別名裸のモータと呼ばれている⁷⁾。クリップモータの構成例を図 10 に示し、作製上のポイントを以下に示す。

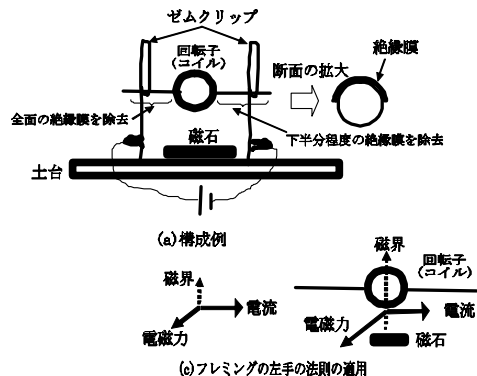


図 10 クリップモータの概観

(1) 回転子（コイル）の作製

エナメル線を巻き付けてコイルの部分を作った後、エナメル線の巻き始めりと巻き終わりの部分を用いて、中心線上の場所を 2, 3 回ぐるぐるとしるのように巻きつける。その際、しばった部分が中心線状になること、強く締め付けること、縛り終えた線がコイルの側面からみて、右と左に分かれていること、などに注意する。

(2) コイルの絶縁膜のはぎ取り方

コイルの巻き始めりと巻き終わりの直線部分は電極と接触し、電流を流さなければならないので絶縁膜を剥ぎ取らなければならない。この際、どちらか一方の直線部分の絶縁膜は全て剥ぎ取り（図 10 のコイルの左側）、もう片方は、長さ方向に下半分程度の絶縁膜を剥ぎ取り（図 10 のコイルの左側）、上半分程度絶縁膜は残すようにする。絶縁膜はカッタナイフを用いて剥ぎ取る。剥ぎ取り方が雑になると回転に影響するのでこの作業は丁寧に確実に行わなければならない。特に、コイルの根元付近は注意深く行う。

この作業後、電極にセットし、形状的なバランスを確かめ、不具合な部分は調整を行い、回転運動に支障を来す要因は取り除き、乾電池により電流を流

す。このモータは、通電しただけでは回転しないのでコイルに指で軽く回転を与えなければならない。回転を与えるとその弾みでコイルが勢い良く回り始める。

2.3.1 工夫したこと

筆者は独自にこのモータの一体化を図っていた。その過程で、文献8においてコンパクト化したモータの紹介があることを知り、試作の方向を少し変えることにした。

文献8において一体化したモータの写真を見た瞬間、クリップが用いられている電極を導線に変えたらどうなるだろうか、ということ进行を思いつき、試作を行うことを考えた。その後、導線として種々の太さの銅線を用い、種々の工夫を施した結果、図11に示すようにものが得られた。

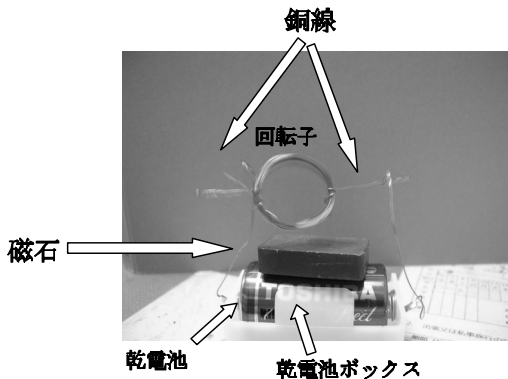


図11 試作器の外観

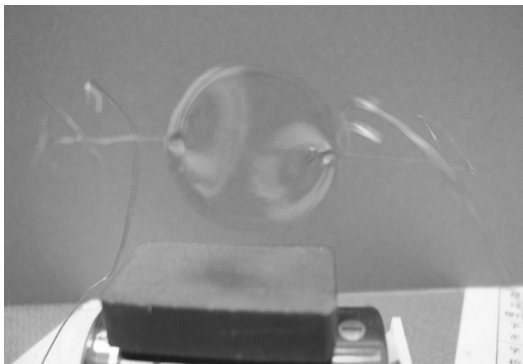


図12 回転の様子

文献8に比べて電極部分の見栄えは良くないが、これが大きな違いを引き出すことになる。乾電池ボックスの両側にある端子に手で簡単に曲がる程度の太さ(0.5mm以下)の銅線(長さ5~10cm程度)を一本ずつ接続し、種々の調整を行いながら動作を観察した。これまでのモータと比べて大きく異なるのは、回転子のみならず電極の銅線も大きく動く点である(図12参照)。そのため、動きがダイナミックになる。通常、電極には堅い材質のものが用いられるので回転子のみが回り、回転子の運動に連動して大きく動き回することは無い。少し重めのコイルを使った場合は上下運動も加わるのでさらに複雑な動きを示すようになる。また、動きながら回転している過程で、コイルの開口面が磁石に瞬間的に吸着する動きを見せる時がある。これは、コイルに電流を流せば、コイルは電磁石となるためにS極とN極が発生する。磁極が発生すればコイルの下部にある磁石との間に磁気クーロン力(吸引力、反発力)が働く。これを踏まえると、回転中のコイルの開口面が下部の磁石に引き寄せられたのは、複雑に動いている過程で偶然に吸引力が大きく働くような位置関係になったためであると考えられる。この傾向は、下部の磁石とコイルの距離が短い時に特に強く現れ、場合によっては、磁石に引き寄せられたコイルがそのままの状態になり回転しない場合もある。堅い材料で電極を作った場合は、この様なことは見られず、コイルが回るだけであるのでこの様な動きは今回試作したモータの特徴の1つといえる。

このように、試作したモータは、フレミングの左手の法則のみならず電磁石の説明にも使える。

2.3.3 実施結果について

2008年の「第7回湘南発大学技術市場・湘南から未来を発信」における湘南工科大学によるものづくり教室「変幻自在なモータをつくろう!!」を筆者が担当し、このモータを作らせた。小学生(1~6年生)が受講対象者である。40名ずつ二回に分けて(総数80名)試作させたところ、予想通りいろいろな回転運動を示すモータが得られた。作業時間としては、経験的な判断から10分程度で完成するだろうと見込んでいたが、数分で完成させる者もいれば、20分程度かかる者もいた。つまずきの多かった箇所は、エナメル線の絶縁膜を剥がず作業であった。絶縁膜のはぎ取りは、サンドペーパーではなくカッターナイフを使用した。サンドペーパーの場合ははぎ取りにムラができ、それが回転運動に悪影響を及ぼすことが考えられたので確実にはぎ取りができるカッターナイフを用いることにした。しかし、小学生

の中には、カッターナイフの使い方に戸惑う者、力の入れ方が分からない者、絶縁膜がはぎ取りにムラを作る者、などのいろいろおり、それへの対応で忙しかった。いろいろ手間取りながらも完成した瞬間は、誰しもが喜びを現わしており、雰囲気的にも盛況であったので工夫した甲斐があったと感じた。

2.4 電動機における発電現象の確認

一般に、“電動機は、電気エネルギーから機械エネルギーをとりだすもの、電力を機械的な動力に変換する装置、その原理はフレミングの左手の法則である”あるいは“発電機は、機械エネルギーから電気を取り出すもの、動力を電力に変換する装置、その原理はフレミングの右手の法則である”というようにいわれており、電動機と発電機は異なるものであるような印象を受ける。電動機と発電機の中では、フレミングの右手・左手の法則による誘導起電力の発生と電磁力の発生の両方が起きている。発電機では、主目的である誘導起電力の発生に伴い電磁力が副次的に発生するのでそれを超えるような機械的な動力を外から与える必要がある。一方、電動機では主目的である電磁力の発生に伴い誘導起電力が副次的に発生するので、それを超えるような電力を外から与える必要がある。

本稿では、フレミングの右手・左手の法則が混在する事象の中から電動機における発電現象および電動機が発電機になることを取り上げ、マブチモータを用いた自作器について報告する。

2.4.1 実験装置の自作および観察

(1) 自作器の概要

図 13 に自作器の外観を示す。動作時のマブチモータ (RE-280) の入力端子間の電圧波形は、直流電圧と誘導起電力の合成波形になる。したがって、誘導起電力を単独で観察するには、発電機として用いれば可能になる。そこで、同じタイプのマブチモータのシャフトを機械的につなげ、片方を通常の電動機として、もう片方は発電機として用いることにした。

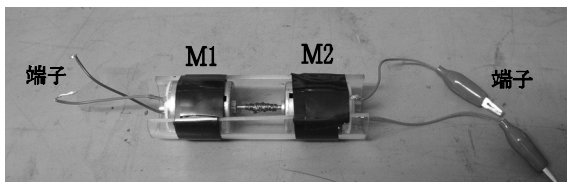


図 13 自作器の外観図

(2) 方法および結果

端子間の電圧波形は、デジタルオシロスコープを用いて観察する。オシロスコープのプロブ（以下プロブと略す）は、モータの配線の赤の導線を正、青の導線を接地 (GND) するように取り付ける。回転数は、LEDストロボにより測定する。

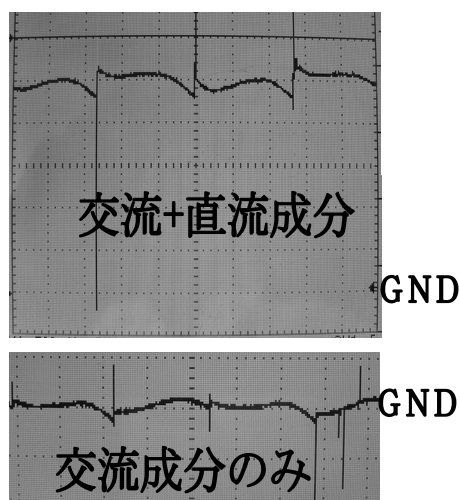
まず、プロブをM1の端子間に接続する（一連の測定が終わるまで測定位置は変えない）。次に、直流電圧源 (30V、3A) をM1の端子に接続し、電圧計を見ながら調整して3Vを印可する。回転が安定した後に、波形を観察・収録する。

次に、直流電源を取り外し、M2の端子間につなぎ変える。この際、M1に印加したときの極性と逆になるように印加する。その理由は、M1が電動機として回転した方向と発電機として回転させられる方向を同じにし、最初に観察した電圧波形に含まれている誘導起電力成分の波形と発電機としたときの誘導起電力の波形が比較できるようにするためである。

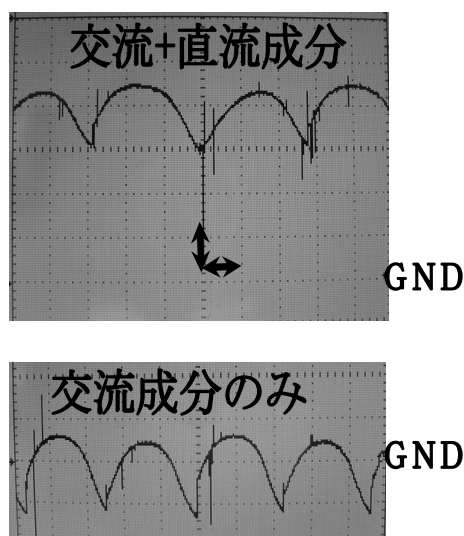
観察例を図 14 に示す。図を見ると、電動機とした場合 (a) と発電機 (b) とした場合とで波形が異なるのがわかる。また、発電毎に変化が規則的に現れているのもわかる。波形に含まれるにひげ状の急峻な成分は、ブラシと整流子間で起きる電流の方向切り替えに伴う火花放電に起因するものである。この図から電動機でも誘導起電力が発することがわかる。もちろん、発電機にもなるのがわかる ((b) 参照)。

電動機における誘導起電力は、流入電流とは逆向きになるので逆起電力として作用するといわれている。つまり、電動機を一つの電源と見なせば起電力の異なる2台の電池を並列接続した状態と同じになる。このように考えると、(a)の左側の図において波高値が供給電圧 (約3V) より小さく、(b)の左側の図の波高値より大きくなったことは、容易に説明ができる。起電力の異なる電池を並列に接続した場合、合成電圧は、大きい起電力よりは小さく (内部抵抗における電圧降下分が差し引かれる)、小さい方の起電力よりは大きくなる (内部抵抗における電圧降下分が加わる) ので、これと同じことが起きたものと考えられる。

誘導起電力は、磁束と回転速度に比例するといわれているのでその確かめを行った。測定は、回転数と交流成分の大きさ ((b) 参照) の関係を調べた。測定結果を図 15 に示す。図を見ると両者の関係が比例関係にあることが確かめられた。



(a) 電動機として用いた時



(b) 発電機として用いた時

N : 3700回転/分、
V : 0.5 v/div、
H : 0.5m s/div

図 14 電圧波形の観察例

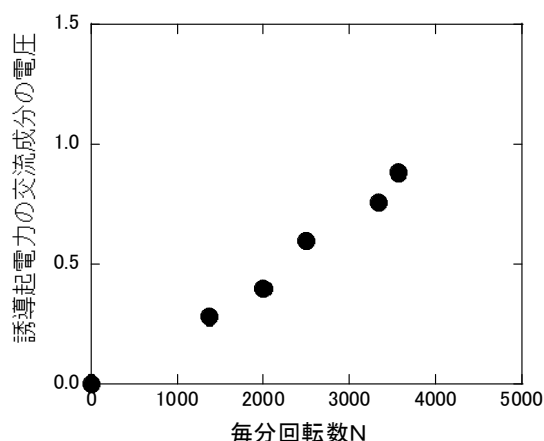


図 15 毎分回転数に対する誘導起電力の交流成分の関係

電動機における誘導起電力の発生および発電機におけるトルクの発生は、フレミングの右手・左手の法則より容易に説明できる。前者の観察は容易であるが後者のトルクの発生を実際の発電機で観察するのは容易でない。この事象を簡単に観察・体感できる一例として、うず電流を使ったものがある。よく知られているのは、アルミ板の小片と磁石を用いた実験である。アルミ板を机上に置き、それに平行になるように磁石を近接させ、前後左右に素早く磁石を平行移動させる。そうすると磁石の移動方向にアルミ板が移動するのが観察できる。

この動作は、レンツの法則およびフレミングの右手・左手の法則を使って説明できる。アルミ板および磁石を自由にした実験では、発電に伴うトルクの発生を観察・体感するのは困難なのでアルミ板あるいは磁石のいずれかを固定させた状態で実験を行うのが良い。片方を固定すると力は制動力として観察および体感することができる。制動力を発現させるには、回転運動あるいは落下運動を使う場合が多いが、手っ取り早い方法としては、机上に磁石より少し大きめのアルミ板を置き、指で摘んだ磁石をアルミ板上で前後左右にすばやく滑らす方法がある。この時、アルミ板に検流計を接続しておけば、磁石の移動によりアルミ板に電流が誘導されたことを確認することができる。そうすれば、発電に伴う力の発生について実感が高まると思われる。

このように、磁石が移動することに伴い、電流が発生し、それに伴い力が発生する、というフレミングの右手および左手で説明される事象が同時に発

生することが実感を持って観察できる。この実験によれば、この実験 1 つでそのほかの類似する実験を通して、発電現象と力の発生が共存していることを観察・体感することができる。そして、どちらかの作用を優勢にさせることで電動機あるいは発電機という機器が作られていることが再認識できる。

3. フレミングの右手の法則に関する実験器の試作

3.1 渦電流の観察

渦電流は、変化する磁界中に金属が存在した場合に誘導される^{9) -11)}。渦電流は、その大きさが微弱であり、通常の電流計では測定が困難であると考えられるので、検流計（電流目盛り： 2.5×10^{-6} A/div、電圧目盛り： 1.6×10^{-4} V/div、倍率：1、1000）を用いて観察する。1 台の検流計を用いて渦状に発生する様子を印象づけることは困難であるので複数の検流計を用いる。その瞬間に複数の検流計の指針が振れる様子を観察すれば、誘導電流が渦状に発生していることが容易の想像できると思われる。磁界の供給は市販のネオジウム磁石を用いる。金属板（アルミ板）に磁石を接触させながら平行方向に滑らす方法と上方から垂直にアルミ板に磁石を接近させるあるいはアルミ板に接触させた状態から素早く上方に磁石を遠ざける方法で渦電流を発生させる。

3.1.1 装置の試作

図 16 に試作した装置の外観を示す。固定台の上においたアルミ板（円状）の淵に 3 台の検流計をほぼ等間隔に接続した。接続する極性は、各検流の正・負が交互になるようにした。磁石は、磁力の強いネオジウム磁石（丸型、 $30 \Phi \times 15$ mm、表面磁束密度 5 kG）を用いた。

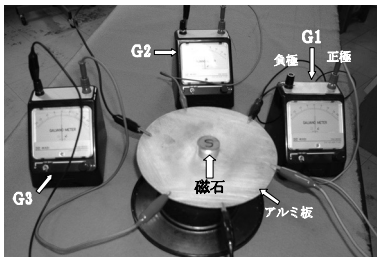


図 16 水平においたアルミ板に対して垂直方向に磁石の端面を遠ざけた時および近づけた時に発生する誘導電流（渦電流）を観察する装置の外観図（その 1）

渦電流の生成はアルミ板の形状に依存しないが、観察者（学習者）に渦電流が渦状に生成することを意図的に印象付けるために円形のアルミ板（直径約 190 mm、厚さ 1 mm）を用いた。

3.1.2 観察結果および考察

図 17 は、N 磁極端面を下に向け、アルミ板に対して垂直方向に近づけた際に発生する誘導電流の様子を示したものである。この場合、検流計（倍率 1000）の指針は全て正の符号領域に振れた。N 磁極が近づいたために対面するアルミ板には、その磁束を弱める方向に、すなわち同磁極（N 磁極）が形成される。したがって、N 磁極が形成される向き、すなわち反時計方向を向く電流が発生する。このことはレンツの法則から容易に理解できる。したがって、アルミ板に接続された検流計の正極側から電流が流入するので指針は正符号側に振れたのである。

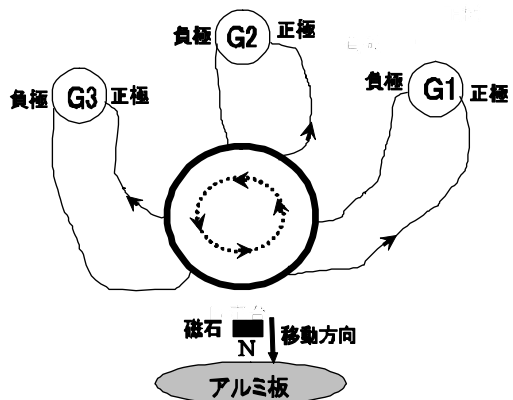


図 17 N 磁極の磁石をアルミ板に近づけた時の誘導電流（渦電流）の発生概観図

渦電流の発生はフレミングの右手の法則からも説明することができる（図 18 参照）。この時、注意するのは磁石から出ている磁力線のうち、電流の発生に寄与する成分の向きである。磁力線は N 磁極端面から S 磁極端面に向かうので極端に描けば、端面内、端面から淵に向かう部分、淵から他磁極に向かう部分の三つの部分に分けることができる。便宜的な表現として、導体の移動によって磁力線を切ることにより誘導電流が発生する、といわれる。したがって、誘導電流の発生に寄与する磁力線の成分を見

分けるには、導体の移動方向に対して垂直方向に存在する成分の存在を知ればよいことになる。この視点から判断すると、磁石の端面付近に存在する3つの成分のうち端面から淵に向かう部分が寄与することが分かる（図18（b）参照）。したがって、この成分の向きとアルミ板の相対的な運動方向をフレミングの右手の法則にあてはめると図18（c）に示す向きに誘導電流が発生することが分かる。ここでは、左右2カ所の様子を示しているがベクトルを反時計方向に回していけば図18（a）に示すように反時計回りに渦状の電流が発生するのが分かる。以上のようにレンツの法則に比べて少し面倒かも知れないがフレミングの右手の法則からも矛盾なく説明することができる。

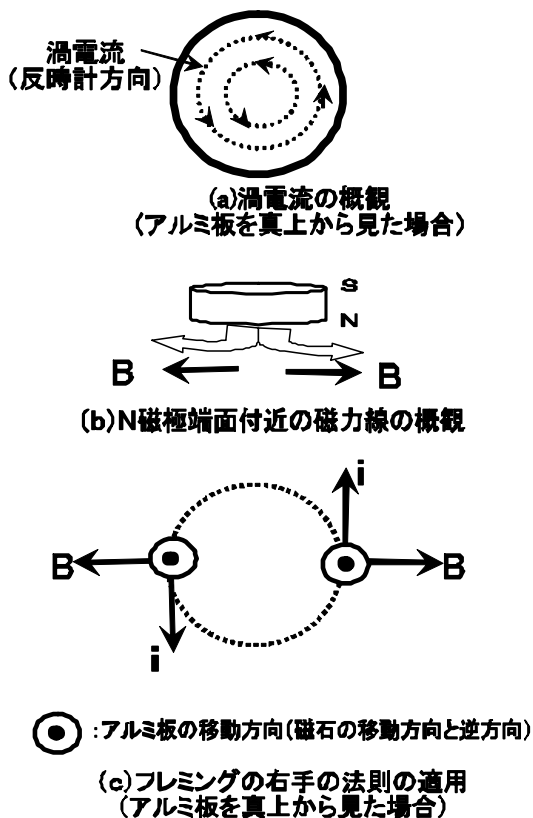


図18 N磁極の磁石をアルミ板に近づけた時に発生する誘導電流（渦電流）の説明図

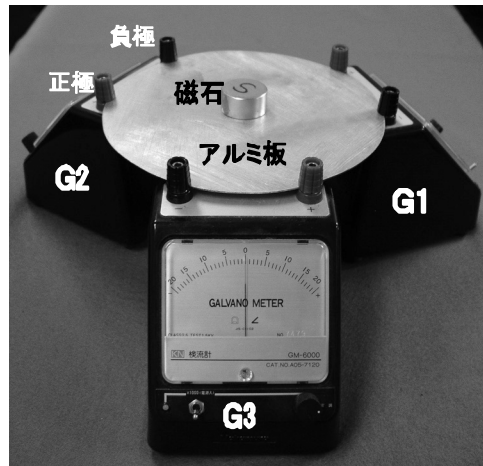


図19 アルミ板を検流計に直接接続した装置の外観図

ここで、観察中において気になったことがある。それは、検流計とアルミ板を接続する導線の存在である。導線の這わせる状態を変えながら検流計の指針動きを調べた結果、その影響が指針の動きを支配する場合があることを確認した。そこで、導線を使わずにアルミ板と検流計を接続させる方法を試行錯誤した結果、図16において導線を外し、アルミ板をそのまま検流計の接続端子に接続することを考えた（図19参照）。この状態で図16の時と同じように磁石を動かした時の検流計（倍率1000）の指針の動き方を観察し、同じ結果が得られた。導線を使っていないので見た目にもすっきりしており、導線に誘導される電流の影響を考える必要もないので都合であるといえる。

この装置は、アルミ板の中央付近で磁石を近づけたり遠ざけたりした時だけではなく、各検流計の接続端子付近で近づけたり遠ざけたりした時あるいはアルミ板状を滑らせた時の誘導電流の発生も観察できる。この場合は、レンツの法則あるいはフレミングの右手の法則のいずれかを用いて、誘導電流の発生方向に仮説を立てながら確かめるとより効果的な観察実験が可能になると考えられる。

3.1.3 装置の改善

試作器の概観図を図20に示す。図20（a）に示すようにアルミ板の下方に2台の検流計（G1、G2）を接続した実験器を試作した。磁石による検流計へ

の影響をできる限り少なくするために磁石から検流計を遠ざける必要がある。

そこで、大気中で磁石を動かし、磁石との距離を変えながら検流計の指針の振れ方を調べた結果、約 10 cm 程度離ればその影響が検知感度以下であるのが分かった。これと検流計を 2 台接続することを踏まえ、アルミ板の大きさを直径 26 cm とした。また、検流計をアルミ板に直列に接続するために、アルミ板の縁を加工した (図 20 (b) 参照)。5~10 mm 間隔で約 1.5 cm の切り込みをアルミ板の周囲全体に施し、その部分全体を直角に曲げた。切り込みを入れたことで検流計をアルミ板に直列に接続できるようにした。また、接続線の影響を少なくするために、磁石の移動方向に対して平行になるように垂直に配置した (図 20 (c) 参照)。アルミ板と検流計との接続は、リード線を用いた場合、それへの誘導が問題になるのでそのような線を用いずに、できる限り簡単にするためにワニ口クリップとバナナクリップを直接はんだ付けしたものを用いた。アルミ板を円状にしたのは、観察者にアルミ板に誘導される電流の様子が渦状になることを印象づけるための演出である。

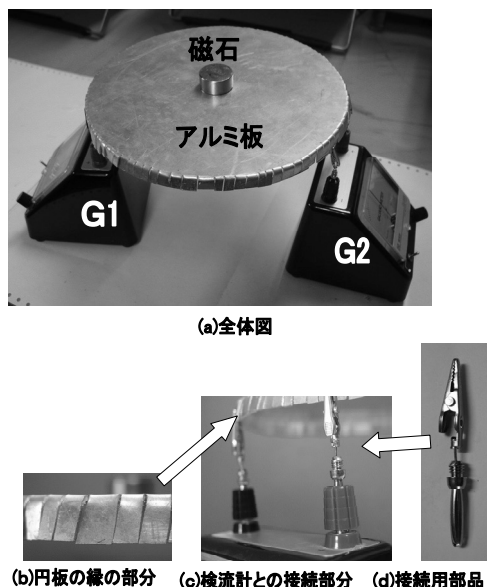


図 20 水平においたアルミ板に対して垂直方向に磁石の端面を遠ざけた時および近づけた時に発生する誘導電流 (渦電流) を観察する装置の外観図

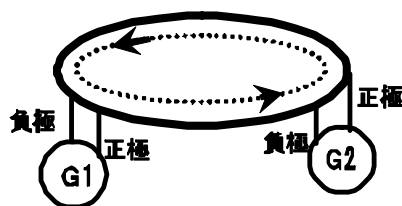
3.1.4 測定結果

図 20 (a) の中央においてあるネオジウム磁石 (丸型、 $30\Phi \times 15\text{mm}$ 、表面磁束密度 500 mT) を素手で持ち上げ、中心から遠ざけるあるいは中心に近づける動作を行い、その時の G1、G2 の指針の振れを観察する。

アルミ板に N 極端面を対面させ、垂直方向に近づけた場合、アルミ板にはレンツの法則およびフレミングの右手の法則に則り反時計方向に誘導電流が発生する。これを試作器で再現した場合、G1 (倍率 1000)、G2 (倍率 1000) 共に指針は負の符号領域に振れることになる。確かめた結果、その通りになった。磁石を上方に移動させた場合は、逆の結果になるが、それもその通りになった。G1 と G2 の指針の動きをつなぎ合わせるとアルミ円板の周囲に沿った円状の誘導電流の様子が描けるようになる (図 21 参照)。



(a) 磁石の移動の仕方



(b) 誘導電流の生成に対する概観図

図 21 N 極の磁石をアルミ板に近づけた時の誘導電流 (渦電流) の発生概観図

4. おわりに

電磁気学において有名な法則の 1 つであるフレミングの右手の法則および左手の法則に関する実験教材の試作を行なった。学習者に認知的不調和が誘発されることを期待しながら工夫を施した。実験器あるいはそれを使った演示実験の成果につい

ては、統計的な調査を行なっていないので明言できないが、観察中の学習者の表情からある程度の効果があったことを実感している。ただし、その誘発がその場限りで終わってしまったか持続的な学習を導いたか不明である。これは、今後の課題である。

引用文献

- 1) 黒川ほか：「今、なぜ、若者の理科離れか」，2005，財団法人 日本学術協力財団.
- 2) 稲垣佳世子・鈴木宏昭・亀田達也：「認知過程研究」，157-160，2002，放送大学大学教育振興会.
- 3) 大石高生・久保田競：「記憶と情動の脳科学」，32-37，2006，講談社.
- 4) 湯澤正通：「認知心理学から理科学習への提言」，214-223，2004，北大路書房.
- 5) <http://www.nararika.com/butsuri/enji/dounyumenu.htm> (平行電流)
- 6) <http://www.phy.sakura.ne.jp/hp/heikou.htm> (演示実験 平行電流のおよぼす力)
- 7) 森政弘：ロボコンマガジン NO.1 (1998) 60-6.
- 8) <http://homepage3.nifty.com/KUSUDA/JKEN/buturi/motor.htm>.
- 9) 宮島龍興訳：ファイマン物理学 岩波書店 (1977) 207.
- 10) 安達三郎・大貫繁雄：電磁気学 森北出版 (2002) 140.
- 11) 平井紀光：やくにたつ電磁気学 ムスリ出版 (2007)